

УДК 621.317

**М. А. Анкуда, И. О. Оробей**

Белорусский государственный технологический университет

**АДАПТИВНЫЙ ВРЕМЕННОЙ ЯМР-РАСХОДОМЕР**

В статье описан способ измерения расхода жидкостей, содержащих протоны. Измерения проводились бесконтактным образом при помощи полей, проникающих через стенки трубопровода. Этот метод основан на эффекте ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Предложена структурная схема однокатушечного ЯМР-измерителя расхода меточного типа с временным разделением процессов постановки и регистрации метки в потоке. Данный измеритель расхода имеет возможность изменять объем анализатора за счет переключения секций в катушке регистрации, что приводит к повышению точности и расширению диапазона измеряемых расходов. Также приведено описание системы обработки данных с возможностью изменения частоты постановки меток в потоке. Частота постановки метки зависит от значений времен релаксации веществ и времени перемещения метки ЯМР по измерительному участку. При расчетах учитывалось распределение скоростей в зависимости от режима течения и дополнительного намагничивания на измерительном участке. Представленный способ построения первичного преобразователя и системы регистрации позволяет за небольшие промежутки времени обрабатывать полученную информацию и адаптировать всю систему при изменении состава жидкости либо ее скорости перемещения.

**Ключевые слова:** расходомер, метка, адаптация, намагниченность, ядерный магнитный резонанс, релаксация.

**M. A. Ankuda, I. O. Orobei**

Belarusian State Technological University

**THE ADAPTIVE TEMPORAL NMR FLOWMETER**

This article describes a method for flow measurement of liquids containing protons. Measurements are made on the method of interaction with the test medium in a non-contact manner using fields that penetrate through the wall of the pipeline. This method is based on the effect of the nuclear magnetic resonance (NMR). The structural scheme of single-coil NMR marker-type flow meter with a division processes of creating and reading markers in the flow. This flow meter is able to modify the size of the analyzer by switching sections in the coil of registration, which leads to higher accuracy and expand the measurable flow diapason. The description of the data processing system for change a frequency setting marker in the flow is also included. The frequency setting of marker depends on the relaxation time substances and motion marker of NMR on the measurement portion. The calculations take into account the velocity distribution depending on the flow regime and the additional magnetization in the measuring portion. The present method of construction of the primary device and registration system allows for short periods of time to process the information received and to adapt the whole system when changing the composition of the liquid or its speed of movement.

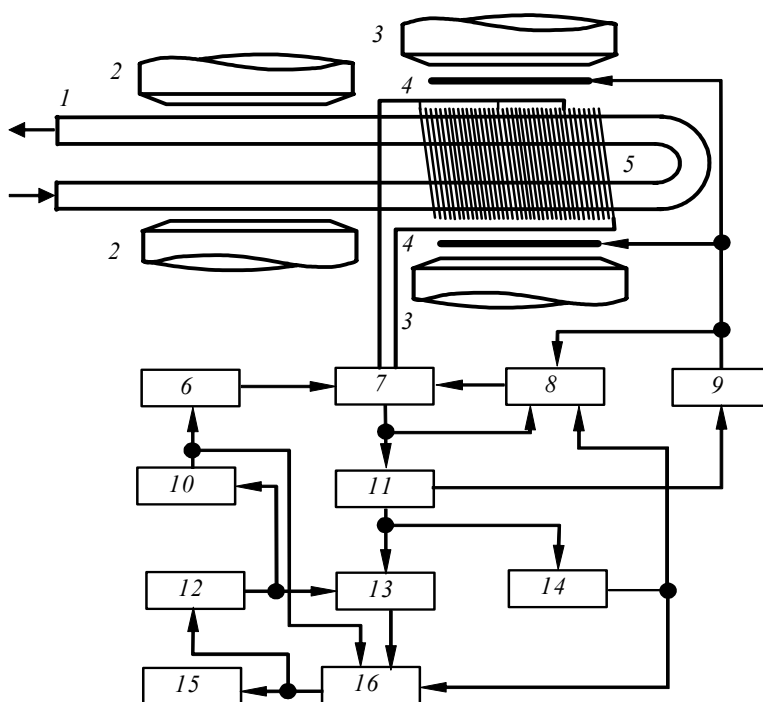
**Key words:** flowmeter, marker, adaptation, magnetization, nuclear magnetic resonance, relaxation.

**Введение.** Эффективное управление технологическими процессами требует применения устройств, фиксирующих технологические параметры. Значительная доля измерений приходится на определение расходов веществ, в частности протоносодержащих жидкостей. Измерения расхода удобно осуществлять методами, в которых взаимодействие с исследуемой средой осуществляется бесконтактным образом при помощи полей, проникающих через стенки трубопровода. Такие методы могут основываться на эффекте ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Использование ЯМР в движущихся средах для технологических процессов ограничивается жидкостями или сжатыми

газами, содержащими водород, фтор, литий, хлор и фосфор.

**Основная часть.** В работе рассматривается меточный однокатушечный ЯМР-расходомер с временным разделением процессов отметки и регистрации, в котором за счет изменения объема анализатора повышается точность и расширяется диапазон измеряемых расходов. Структурная схема расходомера приведена на рисунке.

Измеряемая жидкость по трубопроводу 1 через магнитное поле поляризатора 2 направляется в магнитное поле анализатора 3. После намагничивания в полях поляризатора и анализатора жидкость поступает в катушку регистрации 5.



Структурная схема адаптивного временного ЯМР-расходомера:  
 1 – трубопровод; 2 – магниты поляризатора; 3 – магниты анализатора;  
 4 – катушки модуляции; 5 – катушка регистрации; 6 – генератор синхронизации;  
 7 – спиновый детектор; 8 – устройство автопоиска и стабилизации  
 резонансных условий; 9 – генератор модуляции; 10 – генератор синхронизации;  
 11 – синхронный детектор (СД); 12 – функциональный преобразователь;  
 13 – полосовой фильтр; 14 – детектор резонансных условий (ДРУ);  
 15 – схема адаптивного усреднения; 16 – фазовый детектор

При включении прибора из-за расстройки резонансных условий в анализаторе отсутствует сигнал ЯМР на выходе спинового детектора 7. На выходе синхронного детектора (СД) 11 напряжение близко к нулю, при этом не превышает порог срабатывания детектора резонансных условий (ДРУ) 14, а на его выходе устанавливается высокий потенциал, соответствующий расстройке резонансных условий в анализаторе. ДРУ переключает в режим поиска устройство автопоиска и стабилизации резонансных условий 8, которое сканирует частоту генерации спинового детектора пилообразным напряжением и принудительно устанавливает высокое напряжение, соответствующее минимальным расходам, на выходе фазового детектора 16. Функциональный преобразователь 12 переключается в состояние с низким потенциалом и устанавливает минимальную частоту  $F_m$  генератора синхронизации 10 и полосу пропускания регулируемого полосового фильтра 13, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) которого согласуется с  $F_m$  [1].

В момент прохождения резонансных условий на выходе ДРУ появляется низкий потенциал, устройство 8 переключается в режим стабилизации, а управляющий вход фазового де-

тектора не оказывает воздействия на его выход, т. е. напряжение фазового детектора определяется разностью фаз между сигналами с генератора синхронизации и регулируемого полосового фильтра.

Сигнал ЯМР наблюдается периодически, для чего используется модулирующее синусоидальное поле звуковой частоты, создаваемое катушками модуляции 4, запитываемыми от генератора модуляции 9. Анализ вектора намагниченности движущейся жидкости производится при помощи катушки регистрации 5 анализатора, соединенной со спиновым детектором 7 [2]. В объеме катушки 5 с разделением по времени осуществляются постановка метки ЯМР и анализ ядерной намагниченности. Отметка жидкости в потоке производится инверсией вектора намагниченности при повышении амплитуды радиочастотного поля катушки 5 спинового детектора 7 под воздействием импульса генератора синхронизации 6. В момент отметки за малый промежуток времени намагниченность жидкости в катушке меняет знак, после чего отмеченный участок выносится из катушки. При этом намагниченность изменяется и после полного выхода метки принимает прежнее значение, равное намагниченности

неотмеченной жидкости. Далее метка перемещается со скоростью течения жидкости вдоль по петле трубопровода 1 и опять попадает в катушку 5, что приводит к изменению общей намагниченности в объеме этой катушки. При прохождении метки через катушку 5 знак средней намагниченности в объеме катушки не меняется, поскольку одновременно через катушку проходят ветви трубопровода с отмеченной и неотмеченной жидкостью. В анализаторе метка формирует сигнал на выходе спинового детектора 7, пропорциональный намагниченности в объеме катушки 5. Временная задержка от постановки метки до ее анализа в первом приближении обратно пропорциональна расходу жидкости.

При малом расходе из-за большего времени распространения метки по измерительному участку существует большой сдвиг фаз между сигналами с генератора синхронизации и регулируемого полосового фильтра, сохраняются состояние функционального преобразователя, малая частота отметки  $F_m$ , задаваемая генератором синхронизации, и АЧХ полосового фильтра. Увеличение расхода снижает информативный фазовый сдвиг. При этом уменьшается напряжение на выходе фазового детектора, переключается функциональный преобразователь, одновременно изменяя на  $F_6$  частоту отметки и АЧХ полосового фильтра, оставляя неизменной ширину полосы его пропускания  $\Delta F$ . Время адаптации системы регистрации не превышает периода отметки после изменения расхода. Схема измерения преобразует напряжение фазового детектора в расход и производит индикацию расхода. Это взаимодействие между блоками сохраняется при любых изменениях расхода.

Функциональный преобразователь, программное управление генератором синхронизации и регулируемым полосовым фильтром реализовано программным образом в микроконтроллере. ДРУ представляет собой пиковый детектор с постоянной во времени, превышающей период отметки, и компаратор. В качестве фильтра с регулируемой полосой пропускания оптимальными являются цифровые фильтры [3], которые обладают стабильными фазовыми характеристиками и не вносят дополнительных погрешностей, обусловленных дрейфом фазовых сдвигов в тракте регистрации.

Из-за релаксации ядерной намагниченности происходит размагничивание ядерно-магнитной метки в случае, когда время перемещения метки по измерительному участку оказывается сопоставимым с временем релаксации. Это может приводить к ограничению минимального измеряемого расхода для жидкостей с малыми временами релаксации. С целью дополнитель-

ной адаптации системы было предложено при изменении величины расхода либо при изменении релаксирующих свойств вещества изменять величину петли путевого тракта трубопровода за счет переключения между обмотками многосекционной катушки регистрации.

Информативным параметром, по которому определяется расход, является время перемещения метки ЯМР по измерительному участку от момента ее постановки до момента регистрации. Проявление ряда особенностей ЯМР в движущихся жидкостях зависит от режима течения, определяемого числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho W L_x}{\mu^*} = \frac{W L_x}{\nu^*}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $W$  – скорость движения жидкости, м/с;  $L_x$  – характерный линейный размер, м;  $\mu^*$  – динамический коэффициент вязкости, Па/с;  $\nu^*$  – кинематический коэффициент вязкости, м<sup>2</sup>/с.

Возможно существование ламинарного и турбулентного потоков в одном преобразователе. Распределение скоростей по сечению трубопровода [4] выполняется по следующим формулам:

$$W_L(r) = 2W_{cp} \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right); \quad (2)$$

$$W_T(r) = 1,23W_{cp} \left( 1 - \frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{7}},$$

где  $W_L(r)$ ,  $W_T(r)$  – скорость движения жидкости на расстоянии  $r$  от оси трубопровода при ламинарном и турбулентном режимах соответственно, м/с;  $W_{cp}$  – средняя скорость движения жидкости;  $r$  – радиальная координата, м;  $R$  – радиус трубопровода, м.

С учетом распределения скоростей и домагничивания на измерительном участке зависимость от времени переменной части намагниченности в объеме регистрации выражается формулой

$$M(t) = \frac{16M_n}{\omega_n} e^{\frac{V_{tp}}{QT_1}} \times$$

$$\times \int_0^R e^{\frac{-(2V_a + V_n)}{S_n W(r) T_1}} W(r) \times$$

$$\times \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^2} \sin \left( \frac{n\omega_n V_p}{2S_n W(r)} \right) \times$$

$$\times \sin \left( n\omega_n \left( t - \frac{2V_a + V_n}{S_n W(r)} \right) \right) r dr, \quad (3)$$

где  $M_n$  – намагниченность на выходе поляризатора, А/м;  $\omega_n$  – частота импульсов отметки, рад/с;  $V_{тр}$  – объем трубопровода между поляризатором и анализатором, м<sup>3</sup>;  $Q$  – расход жидкости, м<sup>3</sup>/с;  $T_1$  – время спин-решеточной релаксации вещества, с;  $V_a$  – объем трубопровода в анализаторе, м<sup>3</sup>;  $V_n$  – объем трубопровода в петле, м<sup>3</sup>;  $S_n$  – площадь поперечного сечения трубопровода на измерительном участке, м<sup>2</sup>;  $W(r)$  – распределение скоростей, м/с;  $n$  – номер гармоники в разложении импульсов намагниченности в ряд Фурье;  $V_p$  – объем катушки регистрации, м<sup>3</sup>;  $t$  – интервал времени от момента отметки, с.

Описание процессов, влияющих на скорость перемещения метки ЯМР, при помощи спектрального анализа намагниченности с последующим синтезом интегральной намагниченности позволяет провести расчет информативного параметра [5], но характеризуется большим временем вычисления. Интерес представляет интегральная оценка информативного параметра и сравнение полученных на ее основе результатов со значениями из (3). Введем величину нормированной относительно максимально возможной в потоке намагниченности, информирующей о метке ЯМР:

$$M_{\text{норм}}(r, dr) = \frac{M_{\text{пер}}(r)S(r, dr)}{M_{\text{max}}} = \frac{M_{\text{пер}}(r)2\pi r dr}{M_{\text{max}}}, \quad (4)$$

где  $M_{\text{пер}}(r)$  – амплитуда метки для слоя на расстоянии  $r$  от центра трубопровода, А/м;  $S(r, dr)$  – площадь кольца толщиной  $dr$  на расстоянии  $r$ , м<sup>2</sup>;  $M_{\text{max}}$  – максимальная амплитуда метки в потоке, А/м.

С учетом (3)

$$M_{\text{норм}}(r, dr) = \frac{\exp\left(-\frac{V_{тр} + 2V_a + V_n}{\pi R^2 T_1 W(r)}\right)}{\exp\left(-\frac{V_{тр} + 2V_a + V_n}{\pi R^2 T_1 W(0)}\right)} 2\pi r dr. \quad (5)$$

Определим скорость метки, принимая во внимание весовой вклад в результирующую метку нормированной переменной намагниченности (5):

$$W_{\text{ЯМР}} = \frac{\int_0^R M_{\text{норм}}(r, dr)W(r)}{\pi R^2} = \frac{2}{R^2} \int_0^R e^{-\frac{V_{тр} + 2V_a + V_n}{\pi R^2 T_1} \left(\frac{1}{W(0)} - \frac{1}{W(r)}\right)} W(r) r dr. \quad (6)$$

Из (6) следует равенство средней скорости потока и скорости метки ЯМР при большом  $T_1$  или постоянстве скорости среды по сечению. Время прохождения меткой ЯМР измерительного участка находится из соотношения

$$t_{\text{пер}} = \frac{2V_a + V_n}{\pi R^2 W_{\text{ЯМР}}}. \quad (7)$$

Время, которое затрачивает метка на прохождение петли, определяется средней скоростью потока и длиной участка, который можно изменить переключением секций обмотки регистрации. С учетом распределения скорости потока по сечению трубопровода существует вероятность того, что сигнал метки размывается до такой степени, что последующая метка будет накладываться на предыдущую.

Также при постоянной частоте отметки случайные погрешности временного расходомера растут с увеличением расхода, а нижний предел измеряемого расхода задается условием  $Q_{\text{min}} = (2V_a + V_n) / T_n$ , которое вытекает из требования однозначности показаний  $T_n \geq t_{\text{пер}}$ , где  $T_n$  – интервал времени между метками. Идея адаптивного расходомера состоит в повышении частоты отметки пропорционально расходу и в соответствующем изменении полосы пропускания канала регистрации, а также в изменении длины петлевого участка.

Тем самым можно добиваться условий, при которых время релаксации определенного объема протонсодержащей жидкости всегда окажется больше, чем время, которое необходимо затратить на прохождение петлевого участка трубопровода. А сигнал каждого одиночного акта измерения может быть использован для оптимальной настройки системы регистрации при последующих измерениях. Такой учет предыстории в реальных системах возможен в связи с ограниченной скоростью изменения расхода.

**Закключение.** Разработанный адаптивный измеритель обеспечивает повышенную точность измерений за счет сужения полосы пропускания канала регистрации по сравнению с временными расходомерами, а также имеет повышенную точность на больших расходах за счет увеличения частоты отметки.

Предложенный однокатушечный меточный ЯМР-расходомер с временным разделением процессов отметки и регистрации позволяет подстраивать устройство таким образом, чтобы размагничивание метки не происходило быстрее, чем время, которое необходимо для прохождения тракта до анализатора.

### Литература

1. Меточный ЯМР – расходомер временного типа с совмещением адаптации системы регистрации к измеряемому расходу и коррекцией измерительной базы по индукции поля анализатора / В. В. Сарока [и др.] // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информатика. 2009. Вып. XVII. С. 73–76.
2. Keeler J. Understanding NMR Spectroscopy. Chichester: John Wiley&Sons, 2007. 526 p.
3. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: справочное руководство. М.: ДодекаXXI, 2008. 512 с.
4. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1978. 736 с.
5. Методика определения информативного параметра меточного ЯМР – расходомера по спектральному разложению намагниченности при движении метки по измерительному участку / В. В. Сарока [и др.] // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информатика. 2009. Вып. XVII. С. 77–81.

### References

1. Saroka V. V., Orobey O. I., Grinuk D. A., Ankuda M. A., Orobey I. O. NMR marker – type flowmeter temporary registration with the registration system to adapt to the measured flow rate and correcting the measurement base for the analyzer field induction. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series VI, Physical-mathematical sciences and informatics, 2009 issue XVII, pp. 73–76 (In Russian).
2. Keeler J. Understanding NMR Spectroscopy. Chichester, John Wiley&Sons, 2007. 526 p.
3. Tittse U., Shenk K. *Poluprovodnikovaya skhemotekhnika: spravocnoye rukovodstvo* [Electronic Circuits: Handbook for Design and Application]. Moscow, DodekaXXI Publ., 2008. 512 p.
4. Loytsyanskiy L. G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid and gas mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 736 p.
5. Saroka V. V., Orobey O. I., Grinuk D. A., Ankuda M. A., Orobey I. O. Method of determining informative parameter marker NMR-flowmeter on the spectral decomposition of the motion of the magnetization mark on the measuring section. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series VI, Physical-mathematical sciences and informatics, 2009, issue XVII, pp. 77–81 (In Russian).

### Информация об авторах

**Анкуда Максим Анатольевич** – ассистент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: M.Ankuda@belstu.by

**Оробей Игорь Олегович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: I.Orobey@belstu.by

### Information about the authors

**Ankuda Maksim Anatol'yevich** – assistant lecturer, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: M.Ankuda@belstu.by

**Orobei Igor Olegovich** – PhD (Engineering), Assistant Professor, Assistant Professor, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: I.Orobey@belstu.by

Поступила 01.03.2016